

## Hydraulische Antriebe

Karl Hartmann, Lennart Roos, Johannes Untch, Thees Vollmer

Technische Universität Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

### Kurzfassung

Die Entwicklung der Hydraulik in Landmaschinen ist vor allem auf die weitere Effizienzsteigerung ausgerichtet. Hierfür werden größtenteils system-orientierte Ansätze verfolgt, um schaltungs- bzw. prinzipbedingte Verluste zu reduzieren, teilweise auch über die Verwendung elektrohydraulischer Einheiten. Durch die Schaffung neuer Entwicklungs- und Testumgebungen sowie neuer Werkzeuge für die Systemauslegung soll vorhandenes Potential in Zukunft noch besser ausgeschöpft werden.

### Schlüsselwörter

Arbeitshydraulik, Fahrhydraulik, Load-Sensing, Elektrohydraulik, Hardware-In-the-Loop, Druckangleichung, Leistungsverzweigung, Schmierölhydraulik

## Hydraulic Drives

Karl Hartmann, Lennart Roos, Johannes Untch, Thees Vollmer

Technische Universität Braunschweig, Institute of Mobile Machines and Commercial Vehicles

### Abstract

The development of hydraulics in agricultural applications is mainly focused on increasing efficiency. In order to achieve this, most manufacturers are working on system-oriented improvements that reduce general energy losses resulting from the circuit design. Some cases show, that this can also be approached by the use of electro hydraulics. By building new development and testing environments as well as new software-tools for system design, the existing potential of saving energy shall be exploited even better in the future.

### Keywords

Working hydraulics, driving hydraulics, load-sensing, electro hydraulics, hardware-in-the-loop, pressure conditioning, power split drives, lubrication hydraulics

## Einleitung

Die deutsche Fluidtechnikbranche kann auf ein insgesamt erfolgreiches Jahr 2014 zurückblicken. Der Gesamtumsatz lag bei 6,6 Mrd. Euro. Zwei Drittel davon entfallen auf die Hydraulik, die im Vergleich zu 2013 einen Zuwachs von 4 % verzeichnen konnte. Während die zukünftige Geschäftslage vor allem im Verlauf der zweiten Jahreshälfte eher leicht negativ eingeschätzt wurde, gehen über den Jahreswechsel die Erwartungen für 2015 wieder ins Verhalten Positive. Die prognostizierten 3 % Wachstum entsprächen einer weiteren Festigung des 2013 erreichten Niveaus. Der Exportanteil der Hydraulik lag 2014 bei 57 % und ist damit nahezu konstant geblieben. Die deutsche Fluidtechnik insgesamt ist mit einem Anteil von 25 % nach wie vor der größte Teilnehmer am Weltmarkt [1].

Die Landmaschinenbranche ist nach den Bau- und Baustoffmaschinen die zweitgrößte Abnehmergruppe hydraulischer Antriebstechnik. Hier mussten die deutschen Hersteller nach knapp zweistelligem Wachstum im Vorjahr in 2014 Umsatzrückgänge in ähnlicher Höhe hinnehmen. Wesentliche Ursachen sind vor allem die starke Verkleinerung des französischen Absatzmarktes (bei Traktoren allein um 25 %) sowie schwächere Trends in anderen Hauptmärkten wie Polen und Russland. Nach dem Rekordjahr 2013 erfolgte damit eine Rückkehr auf das Niveau des Jahres 2012, das mit einem Gesamtumsatz der Landtechnik von 7,7 Mrd. Euro ebenfalls als vergleichsweise hoch anzusehen ist [2; 3].

Maßgebende Tagungen im Berichtszeitraum waren das 9. Internationale Fluidtechnische Kolloquium (IFK) in Aachen, das FPNI PhD-Symposium in Lappeenranta, das "Symposium on Fluid Power & Motion Control" (FPMC) in Bath, das 8. Mobilhydraulik-Kolloquium in Braunschweig sowie die 72. Tagung LAND. TECHNIK (VDI-MEG) in Berlin.

## Arbeitshydraulik - System

Bei den Arbeitshydrauliksystemen für Traktoren ist nach wie vor Load-Sensing in Closed-Center-Ausführung (CC LS) die Referenz für die mittleren und gehobenen Ausstattungsreihen. Dieses System stellt bei geringem Komponentenaufwand ein volumenstromgeregeltes System dar, welches für die Regelungsaufgabe auf elektronische Unterstützung verzichten kann. Durch den Einsatz von Individualdruckwaagen (IDW) sind die Verbrauchervolumenströme lastdruckkompensiert. An der Reduzierung der prinzip- und systembedingten Nachteile, wie Schwingungsanfälligkeit und mäßigem Effizienzverhalten wird weiterhin geforscht.

In [4] wurden mehrere Verbesserungsmaßnahmen zur Verlustvermeidung in einem CC LS-System simulativ auf Basis eines statischen, teilsynthetischen Leistungsprofils der Traktorhydraulik untersucht. Als Referenz und Ausgangssystem für die Modifikationen dient das CC LS-System eines Mittelklassetraktors, bei welchem die Regelpumpe von einer Konstantpumpe vorgespannt wird. Das System verfügt über einen gemeinsamen Ölhaushalt für die Arbeits- und Getriebehydraulik und ist ohne eine separate Lenkpumpe ausgestattet. Der Ersatz der konstanten Vorförderpumpe durch eine druckgeregelte Verstellpumpe, wie von Bosch Rexroth mit der A10CNO bereits vorgestellt [5], bedeutet in jedem Betriebspunkt mit geringer Gesamtvolumenstromforderung eine Energieeinsparung; laut gewähltem Profil sind dies im Mittel ca. 28 %. Eine weitere Maßnahme zielt auf eine variable, volumenstrom-

abhängige LS-Regeldruckdifferenz. Bei dem gewählten Ansatz wird die LS-Regeldruckdifferenz proportional zum geforderten Volumenstrom von einem Minimalwert aus erhöht, der durch die Prioritätsventile definiert wird. Somit wird der an den IDW abzubauenende Drucküberschuss bei kleinen Volumenströmen geringer, was ebenfalls zu Energieeinsparungen führt (ca. 19 %). Eine dritte Maßnahme sieht bei Verwendung von Positionssensoren an den Ventilhauptschiebern den Verzicht auf die IDW vor, wodurch deren Strömungswiderstand entfällt (ca. 2 % Ersparnis). Zusammen mit der veränderlichen LS-Regeldruckdifferenz kann der Druckabfall über dem Wegeventil reduziert werden [4].

Der Trend der Untersuchung von aufgelösten Steuerkanten in mobilen Applikationen setzt sich fort [6]. Bei diesen Konzepten wird die geometrische Kopplung der zu- und ablaufseitigen Steuerkanten aufgehoben, indem separate Ventile hierfür verwendet werden. Vorteile dieser Konzepte sind die Reduzierung von prinzip- und systembedingten Verlusten sowie die Verbesserung der Systemdynamik (insbes. Schwingungsreduzierung). Werden pro Ventilscheibe die Verbraucherdrücke gemessen, ist in Kombination mit einer elektrisch verstellbaren Regelpumpe die Umsetzung von Bedarfsstromsteuerungen oder -regelungen möglich, die gegenüber dem CC LS-System Vorteile besitzen. Ebenso kann aber auch ein verbessertes elektrohydraulisches LS-System realisiert werden. Aktivitäten in diese Richtung haben [7] unternommen. Es werden für eine Ventilkonfiguration verschiedene Steuer- und Regelkonzepte simulativ für einen dynamischen Frontladerzyklus an einem Mittelklassetraktor mit dem Ziel der Energieeinsparung untersucht. Somit werden zwei Aktuatoren berücksichtigt, die zeitweise simultan arbeiten. Die Konfiguration umfasst für jede Aktuatorseite zwei 2/2-Wege-Proportionalventile für Pumpen- und Tankanschluss und ein weiteres Ventil für die Eilgangstellung. Diese Ventile sind als elektrohydraulische Sitzventile ausgeführt, die über einen Positionssensor verfügen. IDW sind nicht vorhanden, weil deren Funktion durch eine geeignete Interaktion mit einer elektronischen Steuereinheit in die Wegeventile integriert werden kann. Zusätzlich werden beide Aktuatordrücke sowie der Pumpen- und der Tankdruck gemessen. Die Verstellpumpe ist elektrohydraulisch verstellbar, wodurch Druck- und Volumenstromsteuerungen/-regelungen möglich sind. Aufgrund bekannter Durchflusscharakteristik und gemessener Drücke kann der Ventilvolumenstrom gesteuert werden; dies geschieht stets auf der Aktuatorlastseite. Bei aktiven Lasten garantiert eine PID-Regelung einen Mindestdruck auf der Niederdruckseite. Als Regelkonzept wurden verschiedene LS-Regelungen mehreren Volumenstromsteuerungen bzw. -regelungen gegenüber gestellt, die zum Ziel haben, den Drucküberschuss an der Pumpe zu reduzieren. Für den angenommenen Frontladerzyklus wird für ein konventionelles CC LS-System, welches als Referenz gilt, ein Wirkungsgrad von knapp 60 % erreicht. Die alternativen Regelkonzepte erreichen Wirkungsgrade von ca. 70 % bzw. 80 % [7].

Obwohl aktuell durch entsprechend verfügbare Komponenten auch CC LS-Systeme in kleineren Leistungsklassen umsetzbar sind (vgl. [8]), besteht noch eine weite Marktdurchdringung von Traktorhydrauliksystemen mit Konstantpumpe. Dabei handelt es sich im unteren Leistungssegment häufig um Konstantstromsysteme (KS) oder um sog. Open Center LS-Systeme (OC LS), in denen eine Eingangsdruckwaage (EDW) am Ventilblock die Funktion des Förderstromreglers übernimmt und überschüssigen Volumenstrom zum Tank abführt. Es finden dennoch CC-Ventile mit IDW Verwendung.

Durch die direkte Kopplung der Konstantpumpe an die Verbrennungskraftmaschine (VKM) ist der Pumpenvolumenstrom proportional zur VKM-Drehzahl. Richtet sich die Drehzahl ausschließlich nach dem hydraulisch betriebenen Prozess, ist vom Bediener häufig eine Drehzahl manuell vorzugeben, welche er oftmals übermäßig hoch wählt um Unterversorgung möglichst zu vermeiden. Besonders bei mittlerem und hohem Systemdruck entstehen so nennenswerte Verluste, weil der überschüssige Volumenstrom an der EDW zum Tank gedrosselt werden muss. Dies kann gerade bei nachgerüsteten OC LS-Ventilblöcken zu thermischen Problemen führen.

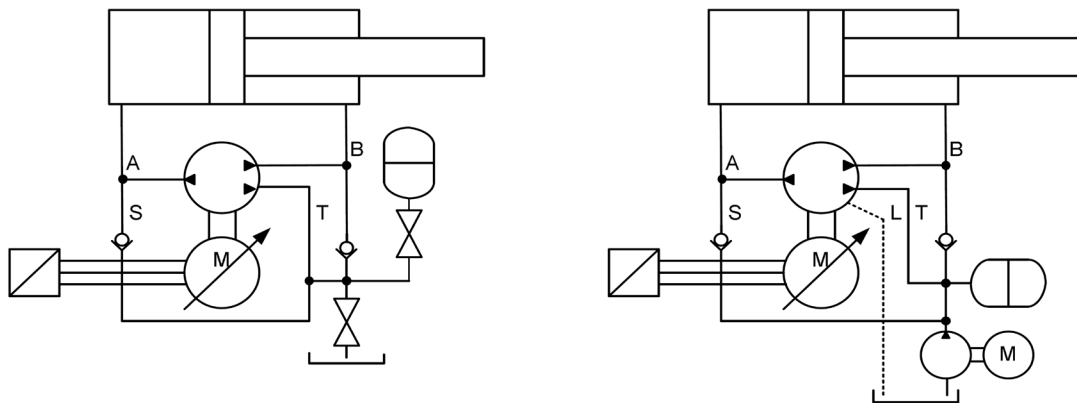
Von [9] wurde auf dem Mobilhydraulik-Kolloquium ein Ansatz vorgestellt, den prinzipbedingten Nachteilen des OC LS über die Einbindung des Fahrers zu begegnen. Es handelt sich um ein Informationssystem, das eine Drehzahlempfehlung auf Basis der aktuellen hydraulischen Verlustleistung an den Bediener ausgibt. Der Hardwareeinsatz ist mit der Verwendung eines Druck- und eines Wegsensors gering. Es werden der Pumpendruck und die Position der EDW erfasst. Durch die Position der EDW sowie deren druckabhängige Durchflusscharakteristik kann auf den Bypassvolumenstrom und schließlich auf die Verlustleistung geschlossen werden. Steigt diese über einen Schwellwert, wird auf einer entsprechenden Anzeige in der Traktorkabine eine Empfehlung zur Reduzierung der VKM-Drehzahl gegeben. Andererseits kann auch eine Warnung vor Unterversorgung generiert werden, wenn die EDW fast vollständig geschlossen ist. Dies ist mit einer Aufforderung zur Erhöhung der Drehzahl verbunden. Ob diesen Forderungen nachgekommen werden kann, hängt von weiteren Prozessen und auch von der Anpassungsfähigkeit des Fahrgetriebes ab.

Neben hydraulischen Schaltungskonzepten und der Bedienerinteraktion wird auch an alternativen Versorgungskonzepten geforscht. Auf der Landtechnik-Tagung 2014 wurden durch [10] ein elektrisch angetriebenes Traktor-Arbeitshydrauliksystem und ein herkömmliches hydraulisch-mechanisches Load-Sensing-System verglichen. Dafür wurde simulativ untersucht, welche Auswirkungen auf die Energiebilanz der Ersatz der hydraulisch-mechanisch geregelten Pumpe des Load-Sensing-Systems durch eine elektrisch angetriebene Konstantpumpe sowie der hydraulisch-mechanischen Lastkombination durch eine elektrohydraulische Mengenbedarfssteuerung haben. Zunächst entsteht in der elektrischen Variante ein Mehrbedarf aufgrund der Verlängerung der Leistungsübertragungskette, da erst mechanische Leistung in elektrische Leistung gewandelt wird, um diese dann im E-Motor wieder in mechanische Leistung umzusetzen. Demgegenüber entstehen energetische Vorteile durch die bedarfsgerechte Anpassbarkeit des Drucküberschusses im elektrohydraulischen System und den weiteren Freiheitsgrad in der Wahl der Verbrennungskraftmaschinendrehzahl unabhängig von der Drehzahl der Hydraulikpumpe.

Da Verstellpumpen insbesondere bei kleinen Schwenkwinkeln vergleichsweise schlechte Wirkungsgrade aufweisen, ist durch den Einsatz einer Konstantpumpe weiteres, in der vorgestellten Untersuchung nicht thematisiertes, Effizienzverbesserungspotential vorhanden [11].

Für eine künftige Leistungsversorgung auf Anbaugeräten können insbesondere bei großer Verbraucheranzahl und räumlich weit verteilten Antrieben elektrohydraulische Kompakteinheiten vorteilhaft sein. Auf dem Internationalen Fluidtechnischen Kolloquium (IFK) 2014

wurde durch [12] ein elektrohydraulischer Aktuator für die verdrängergesteuerte Versorgung von Differentialzylindern vorgestellt, der zunächst für industrielle Anwendungen vorgesehen ist. Es handelt sich um eine Motor-Pumpen-Einheit mit 3 Anschlüssen, in der ein Elektromotor drehzahlvariabel eine Konstantpumpe antreibt. Über den dritten Anschluss werden Differenzvolumenströme der Verbraucherversorgung abgeführt oder aufgenommen, sodass die Versorgung von Differentialzylindern möglich ist, siehe **Bild 1**. Ein Vergleich der Energiebilanz dieses Systems mit einem elektrohydraulischen Aktuator bestehend aus Konstantmotor und Verstellpumpe zeigt signifikante energetische Vorteile des vorgestellten drehzahlvariablen Systems.



**Bild 1:** Schaltplan des elektrohydraulischen Aktuators aus [12]

**Figure 1:** Schematic of the electro hydrostatic actuator in [12]

Durch die große Vielfalt von hydraulischen Anbaugeräten für Traktoren und Landmaschinen ergibt sich ein ebenso großes Anforderungsspektrum an die verwendete Ventiltechnik hinsichtlich Druck, Volumenstrom, Dynamik, etc. In der Entwicklungsphase von Mobilventilen müssen die Funktionsweise und deren Wechselwirkungen mit der Last unter verschiedenen Einsatzbedingungen erprobt werden, was in Form von realen Versuchen kaum darstellbar ist. Eine Alternative stellt eine Hardware-in-the-Loop-Simulationsumgebung (HIL) dar, in der die Versorgungseinheit und der Ventilprüfling physisch vorhanden sind, der motorische Systemteil (Aktuatoren + Last) allerdings simuliert wird. Es handelt sich um eine Kombination von realen Versuchen mit den leicht austauschbaren, gut reproduzierbaren Leistungsgrößen der virtuellen Verbraucher. Der Informationsaustausch zwischen Realität und virtueller Welt ist bidirektional, indem der Ventilvolumenstrom gemessen wird und die zugehörigen Verbraucherdrücke an den Anschlüssen hochdynamisch eingeregelt werden. Hierzu steht einerseits eine (Über-)Druckversorgung als Konstantdrucksystem zur Verfügung. Andererseits besitzt der Prüfstand eine Unterdruckversorgung, die durch eine Vakuumpumpe realisiert wird, wie sie etwa bei der Simulation von aktiven Lasten gefordert wird. Die Regelung der Lastdrücke erfolgt mit einer Zwei-Freiheitsgrade-Struktur, in welcher der gemessene Volumenstrom in Form einer Störgrößenkompensation verwendet wird. In den HIL-Simulationen konnte das Verhalten eines Fronthubwerks für verschiedene Hubwerkventile verglichen werden. Das simulierte Verhalten wurde mit realen Versuchen abgeglichen und zeigt sehr gute Übereinstimmungen im dynamischen Verhalten [13].

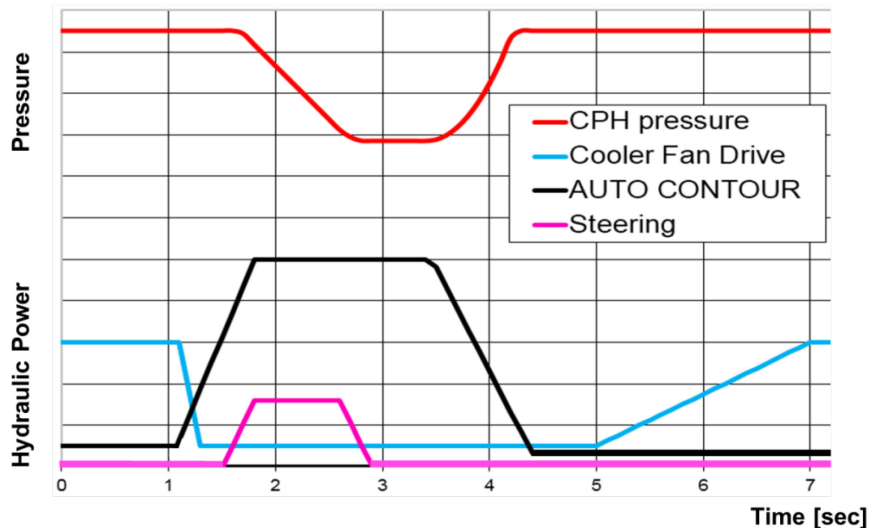
## Arbeitshydraulik - Applikation von Hydrauliksystemen

Auch in den gegenwärtigen Applikationen von Arbeitshydrauliksystemen wird eine Reduzierung prinzipbedingter Verluste umgesetzt. Ein Teil der prinzipbedingten Verluste entsteht durch unterschiedliche Druckniveaus gleichzeitig betätigter Verbraucher. Fendt stellte die neue 1000er-Traktorensérie vor, die im Herbst 2015 in Serie gehen soll. In den Traktoren werden zwei unabhängige Arbeitshydrauliksysteme mit je einer Arbeitshydraulikpumpe verbaut sein. Verbraucher mit unterschiedlichen Druckanforderungen können dann (ggf. sogar dynamisch) auf die beiden Kreise aufgeteilt und auf unterschiedlichen Druckniveaus versorgt werden, wodurch die prinzipbedingten Verluste aus Verbraucherdruckunterschieden sinken [14].

Statt wie beim Zwei-Kreis-Prinzip die Versorgung dem Bedarf der Verbraucher anzupassen, können Lastdrücke mittels Sekundärregelung dem Versorgungsdruck angepasst werden. Durch eine derartige Homogenisierung von Verbraucherdruckniveaus lässt sich ebenfalls eine Einsparung prinzipbedingter Verluste erreichen. Diese wurde im Mähdrescher Lexion der Fa. Claas umgesetzt. Eines der Hydrauliksysteme des Lexion 780 ist als Konstantdruckhydraulik mit 210 bar Maximaldruck und einer Maximalleistung von 38 kW ausgeführt. Über dieses Konstantdrucksystem werden verschiedene Stellfunktionen wie die Bodenführung mit hohen Anforderungen an die Dynamik, Kuppel-, Stell-, Schwenk- und Schneidwerkshubzylinder sowie die Lenkung und der Lüfterantrieb versorgt. Der drehzahlvariable Lüfter wird sekundärgeregelt am Konstantdrucknetz betrieben. Weil im Falle des Lüfters über die Strömungseigenschaften der Luft ein fester Zusammenhang zwischen Drehmoment und Drehzahl besteht, kann in dieser Sekundärregelung auf eine Rückführung der Drehzahl verzichtet werden und stattdessen die Geschwindigkeitseinstellung rein über den zum Drehmoment umgekehrt proportionalen Schwenkwinkel erfolgen [15]. Dies kann daher auch als Sekundärsteuerung bezeichnet werden.

Als Vorteil der Konstantdruckhydraulik wird der im Vergleich zum Load-Sensing einfachere Aufbau ohne Lastmeldeleitung genannt. Zum anderen weist die Konstantdruckhydraulik bei wechselnden Verbraucherlasten bessere hydraulische Eigenschaften auf, weil durch die hydraulische Vorspannung des Systems ein schnelles Ansprechen der Verbraucher erreicht wird und Rückwirkungen von Lastschwankungen auf die Versorgung reduziert werden. Energetische Nachteile gegenüber dem LS-System entstehen vor allem bei wechselnden Druckanforderungen und allgemein niedrigen Verbraucherdrücken. Im Gegensatz zum Traktor, mit dem häufig unbekannte Verbraucher versorgt werden, ist in selbstfahrenden Arbeitsmaschinen wie dem Mähdrescher aber eine bessere Abstimmung der Verbraucherdruckniveaus möglich, weil die Verbraucher genauer bekannt sind. Bewusst werden im Konstantdrucksystem des Lexion keine Verbraucher mit niedrigen Druckniveaus aber hohen Volumenstromanforderungen versorgt. Schließlich kann die Energiebilanz von Konstantdruckhydrauliksystemen durch Brechen von Mengenbedarfsspitzen und kleinerer Dimensionierung der versorgenden Pumpe verbessert werden. Bei erwarteten (gesteuerten) Mengenbedarfsspitzen wird vorher die Lüfterdrehzahl reduziert und so der Volumenstrombedarf gesenkt. Dies wird im **Bild 2** veranschaulicht. Unerwartete Mengenbedarfsspitzen machen sich durch einen Druckabfall im System bemerkbar, die mittels eines Drucksensors detektiert werden. Auch in die-

sem Fall wird der Bedarf des Lüfters durch Zurückschwenken des Motors reduziert. Wegen der hohen Trägheit des Wärmehaushalts führt das kurzzeitige Zurückfahren der Lüfterdrehzahl nicht zu Funktionseinschränkungen. Eine weitere Glättung des Anforderungsprofils wird durch den Einsatz eines Speichers erreicht [15].



**Bild 2:** Druck und Leistungsbedarfe verschiedener Verbraucher im Konstantdrucksystem aus [15]

**Figure 2:** Pressure and power consumption of different actuators of the constant pressure system in [15]

Nicht nur in Verdrängersteuerungen sondern auch in Widerstandssteuerungen gibt es neue Ansätze für Effizienzsteigerungen. Ein relevantes Beispiel liefern Lasthalte- und Senkbremsventile, die in zahlreichen Applikationen für das sichere Halten und präzise Absenken gehobener Lasten benötigt werden. Sie sind im Rücklauf vom hydraulischen Verbraucher vor dem jeweiligen Hauptsteuerventil angeordnet. Energetisch bedeuten diese Elemente typischerweise einen Nachteil, weil sie indirekt über die Leistungshydraulik angesteuert werden. So öffnen die Ventile beim Absenken der Last erst durch den Aufbau eines bestimmten Druckniveaus auf der Zulaufseite des hydraulischen Verbrauchers. Je höher die geforderte Absenkgeschwindigkeit, desto höher ist der erforderliche Druck – und dementsprechend der Bedarf an hydraulischer Leistung. Prinzipiell stünde jedoch in den meisten Fällen allein aus der potentiellen Energie der gehobenen Last genügend Leistung auch für ein schnelles Absenken zur Verfügung.

Bosch Rexroth hat mit "Control Plus" ein neues Lasthalte- und Senkbremsventil vorgestellt, das speziell auf die Anforderungen von Telehandlern ausgerichtet ist. Bei diesen Maschinen spielt die präzise Steuerung des Ausleger-Hubzylinders eine wichtige Rolle. Im Vergleich zu klassischen Senkbremsventilen wird mit dem neuen Ventilkonzept der Leistungsbedarf für Absenkvorgänge auf zweierlei Weise reduziert. Zum einen wird das Ventil nicht mehr über einen Druckaufbau auf der Zulaufseite geöffnet sondern direkt durch einen niedrigen Steuerdruck, der vom Joystick und einem Druckminderventil erzeugt wird. Zum anderen wird der auf der Ablaufseite des Zylinders verdrängte Volumenstrom zu einem Teil auf direktem We-

ge der Zulaufseite zugeführt. Je höher die Last und somit die Druckdifferenz über den Zylinderanschlüssen, desto geringer wird der umlaufende Volumenstrom eingestellt. Mit diesem Prinzip der "Druck-Volumenstrom-Kompensation" wird lastunabhängig ein gleiches Absenkenverhalten und somit eine gute Steuerbarkeit der Funktion erreicht [16].

### Hydraulik in Fahrtrieben

Auf der Tagung Land.Technik 2013 wurde eine elektronisch gesteuerte Verstellung von Hydrosolen durch Niederdruck vorgestellt. Die Einheiten werden unter anderem innerhalb des LVG für den Großgeräteträger Vredo VT5518 eingesetzt [17]. Als Druckquelle wird z.B. der Speisekreis verwendet. Eine Variante mit zwei Steuerventilen wurde auf dem Kolloquium Mobilhydraulik 2014 präsentiert. Hierdurch sind höhere Stellkräfte und eine lastabhängige Regelung möglich [18].

Linde Hydraulics, Daimler und Holmer stellten auf der Agritechnica 2013 hydraulisch synchronisierte Getriebe vor. In der Lösung von Daimler und Linde wird während des Schaltvorgangs die Drehzahl des Hydromotors mit dem (un-)synchronisierten, nachgeschaltetem Getriebe synchronisiert. So kann während der Fahrt der Fahrbereich gewechselt werden, wofür zuvor ein Maschinenstillstand erforderlich war. Von Holmer wurde ein System vorgestellt, bei dem der Schaltvorgang auch bei Teillast möglich ist. Hierbei sind Vorder- und Hinterachse von eigenen Hydrosolen angetrieben. Das Schalten der jeweiligen Fahrbereiche wird für die Achsen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. So kann im Teillastbereich zugkraftunterbrechungsfrei geschaltet werden, weiterhin kann die Voreilung frei gewählt werden [5].

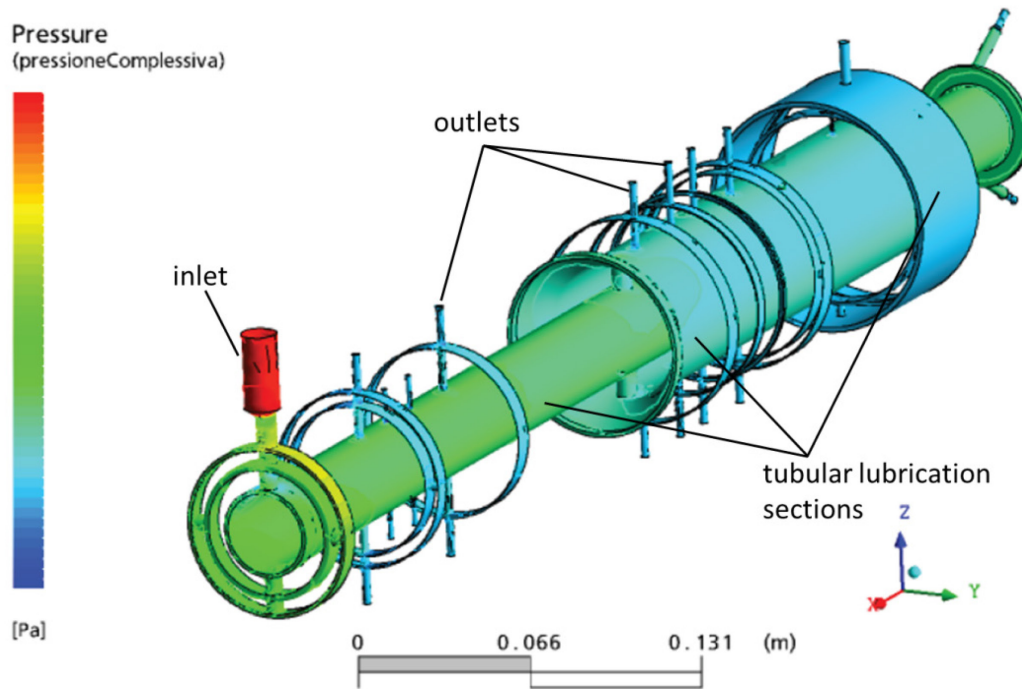
Auf dem VDI Getriebekongress präsentierte Liebherr ein leistungsverzweigtes Getriebe mit drei Hydrosolen. Die eingangsseitige Einheit ist durchschwenkbar ausgeführt, die beiden an Sonne und Hohlrad des Planetengetriebes angeschlossenen Einheiten besitzen nur eine Schwenkrichtung. Durch den Einsatz des dritten Hydrosolen werden weitere hydrostatische Leistungspfade im Getriebe erschlossen. Das Getriebe kann sowohl rein hydrostatisch als auch eingangs- und ausgangsgekoppelt leistungsverzweigt gefahren werden. Durch den Wechsel von Eingangs- auf Ausgangskopplung wird nur in einem Fahrbereich mit Blindleistung gefahren [19].

Die fortschreitende Entwicklung im Bereich der Stufenlosgetriebe bringt auch einen zunehmenden Bedarf an Werkzeugen für deren Auslegung mit sich. Abgesehen von Kosten sind eine optimale Funktionserfüllung (Übersetzungsbereich, Verstelldynamik, etc.) sowie ein höchstmöglicher Wirkungsgrad die dominierenden Ziele. Für letzteren spielt im mechanischen Pfad neben Wälzverlusten vor allem die zur Schmierung aufgewendete hydraulische Leistung eine wichtige Rolle.

Auf dem Internationalen Fluidtechnischen Kolloquium (IFK) 2014 wurde von Ferrari et al. [20] ein Ansatz vorgestellt, um mittels CFD die Druck- und Volumenstromverteilung über der Eingangswelle eines CVT-Getriebes abzubilden. In dem gewählten Beispiel eines eingangsgekoppelten Getriebes liegen Schmierpalte auf drei Ebenen vor, die über insgesamt 19 radiale Bohrungen untereinander sowie mit der Ölversorgung und verschiedenen zu schmierenden



Komponenten verbunden sind (**Bild 3**). Die Modellierung erfolgte in ANSYS mit einem Netz aus Tetraedern und Prismen und einer Mindestdicke von sechs Prismenschichten. In Abhängigkeit der Temperatur wurde mit laminarer oder turbulenter Strömung gerechnet. Zusätzlich zu den Strömungsverlusten wird im Modell die Druckdifferenz aus der Zentrifugalkraft berücksichtigt. Simuliert wurden 13 verschiedene Kombinationen von Relativgeschwindigkeiten der drei Wellen für die drei Temperaturbereiche 0°C, 60°C und 90°C bei einer Gesamtdruckdifferenz von 0,5 bis 4 bar.



**Bild 3:** Druckverteilung über Getriebeeingangswelle, nach [20]

**Figure 3:** Pressure distribution on primary shaft, acc. to [20]

In dem konkreten Beispiel wurde anhand der Simulationsergebnisse unter anderem ersichtlich, dass die Schmierölversorgung der äußeren Ebene am Wellenende bei 0°C Öltemperatur auf unter 20 % im Vergleich zu 90°C absinkt. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Höhe der Gesamtdruckdifferenz bei 0°C im Unterschied zu 90°C nahezu keinen Einfluss auf die Volumenstromverteilung sondern lediglich auf den Gesamtvolumenstrom hat. Erkenntnisse wie diese sollen in Zukunft dabei helfen, durch geeignete Dimensionierung und Anordnung der Schmierölzufuhr sowie durch die richtige Druckeinstellung die Schmierölversorgung gezielt an den Bedarf anzupassen. Auf diese Weise sollen sowohl eine Unterversorgung vermieden werden, die zu Bauteilschädigungen führt, als auch eine Überversorgung, die sich in einem erhöhten Leistungsbedarf durch die Ölbereitstellung und durch Planschverluste äußert.

## **Zusammenfassung**

Auf dem Weg zu einer weiteren Steigerung der Effizienz stehen aktuell system-orientierte Ansätze im Vordergrund. Ziel ist es, vor allem die schaltungs- und prinzipbedingten Leistungsverluste weiter zu reduzieren, sei es durch den Einsatz aufgelöster Steuerkanten oder die Modifikation von Load-Sensing-Systemen mittels geregelter Vorförderung, adaptiver LS-Regeldruckdifferenz oder virtueller Individualdruckwaagen. Auch Ansätze zur elektrohydraulischen Versorgung sind Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Neue Systemapplikationen zielen u. a. über Zwei-Kreis-Hydraulik bzw. sekundärgeregelte Angleichung von Verbraucherdrücken auf eine bessere Entsprechung von Leistungsbereitstellung und –bedarf ab. Bei der Hydraulik in Fahrtrieben geht die Entwicklung in Richtung hydraulischer Getriebesynchronisation und Einsparung von Verlustleistung bei LVG, beispielsweise über Niederdruck-Verstellung. Neue Simulationsansätze sollen helfen, die Auslegung des Schmierölkreislaufs im mechanischen Leistungspfad zu optimieren.

## Literatur

- [1] VDMA, Pressegespräch anlässlich "Motion Drive and Automation" (Hannover Messe) vom 20.01.2014, Frankfurt
- [2] VDMA: Halbjahresumsatz-Ergebnisse, Agrartechnik Sept./2014, S.6
- [3] VDMA, Wiesendorfer
- [4] Pintore, F.; et al.: Modelling and simulation of the hydraulic circuit of an agricultural tractor. Proceedings of the 8th FPNI Ph.D Symposium on Fluidpower (FPNI 2014), 11. - 13.06.2014, Lappeenranta
- [5] Hanke, S.; et al.: Nachlese zur Agritechnica 2013. Neuheiten bezüglich Hydraulik und Antriebstechnik (Teil 1). In: Ölhydraulik + Pneumatik 2014, H. 1-2, S. 32-37
- [6] Untch, J.; Roos, L.: Traktorhydraulik. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2013. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2014. - S. 67-78
- [7] Borghi M.; et al.: Energy Savings in the Hydraulic Circuit of Agricultural Tractors. 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association (ATI 2013), 11. - 13.09.2013, S. 353-361, Bologna
- [8] Hartmann, K.; et al.: Trends bei Landmaschinen und Traktoren. Beobachtungen anlässlich der Agritechnica 2011. In: Ölhydraulik + Pneumatik 2012, H. 1-2, S. 33-37
- [9] Greye, B., Meyer, F., Ligocki, A.: Ein System zur Detektierung von hydraulischen Verlustleistungen in mobilen Arbeitsmaschinen. 8. Kolloquium Mobilhydraulik, Braunschweig 6./7. Oktober 2014, S. 93 - 104
- [10] Sabzewari, K., Ballaire, F., Müller, S.: Energieeinsparpotenzial der Arbeitshydraulik durch die Elektrifizierung am Beispiel eines Frontladlers. AgEng 2014, 72. Internationale Tagung Land.Technik, 19.-20.11.2014, Berlin, S. 449-457
- [10] Roos, L.; Untch, J.; Frerichs, L.: Effizienzsteigerung durch 2-Pumpen-Versorgungseinheiten. 5. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, 25.02.2015, Karlsruhe
- [11] Boes, C.; Helbig, A.: Electro hydrostatic Actuators for industrial Applications. 9th International Fluid Power Conference (IFK 2014), 24.-26.03.2014, Aachen, Bd. 2, S. 134-143
- [12] Trachte, A.; Keuper, G.: Hardware-in-the-Loop-Simulationsumgebung. Für Mobilventile an lastseitigem Über- und Unterdruck. In: Ölhydraulik + Pneumatik 2014, H. 11-12, S. 18-25
- [13] Ersterer, K.: Fendt legt nach: Neue Traktoren-Serie 1000 Vario erreicht 500-PS-Marke. URL <http://www.landtechnikmagazin.de/Traktoren-Artikel-Fendt-legt-nach-Neue-Traktoren-Serie-1000-Vario-erreicht-500-PS-Marke-4973.php>
- [14] Bultschnieder, R.; Strieker, N.: Alles elektrisch? Entwicklungen in der mobilen Arbeitshydraulik am Beispiel eines CLAAS LEXION. Anforderungsgerechte Auslegung von Hydrauliksystemen. AgEng 2014, 72. Internationale Tagung Land.Technik, 19.-20.11.2014, Berlin, S. 439-447

- [15] Bertani, M.: Motion-Control-Lösungen für Telehandler. In: ATZ offhighway, April 2014, S. 64-69
- [16] Schrempp, R.; Schmid, F.; Peter, H.: Safety Requirements for the control of a power-split transmission. 71. VDI-MEG AgEng Tagung Landtechnik, 08.-09.11.2013, Hannover, S. 105-110
- [17] Schrempp, R.; Schmid, F.; Neuner, M.: Elektronik als Potential in der hydrostatischen Antriebstechnik. 8. Kolloquium Mobilhydraulik, 6.-7.10.2014, Braunschweig, S. 77-82
- [18] Christ, C.; Graner, K.: A new hydraulic-mechanical power split transmission for working machines with high requirements on reversing. 3rd International VDI Conference Transmissions in Mobile Machines, 24.-25.06.2014, Friedrichshafen, S. 837-845
- [19] Ferrari, C.; Marani, P.; Paoluzzi, R.; Stefano, C.: Methods of Computational Fluid Dynamics for a CVT Transmission Lubrication System of Agricultural Tractor. 9th International Fluid Power Conference (IFK 2014), 24.-26.03.2014, Aachen

---

**Bibliografische Angaben / Bibliographic Information**

**Wissenschaftliches Review / Scientific Review**

Erfolgreiches Review am 27.02.2015

**Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation**

Hartmann, Karl; Roos, Lennart; Untch, Johannes; Vollmer, Thees: Hydraulische Antriebe. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2014. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2015. S. 1-12

**Zitierfähige URL / Citable URL**

<http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00055051>

**Link zum Beitrag / Link to Article**

<http://www.jahrbuch-agrartechnik.de/index.php/artikelansicht/items/184.html>